

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.01.011

姜亚男, 张亚东, 杨文浩, 等. 镁肥与添加剂施用后土壤镁迁移与淋洗特征研究. 土壤, 2021, 53(1): 80–87.

镁肥与添加剂施用后土壤镁迁移与淋洗特征研究^①

姜亚男^{1,3}, 张亚东^{2,3}, 杨文浩^{2,3}, 吴良泉^{2,3}, 张桃香^{1*}

(1 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 3 福建农林大学国际镁营养研究所, 福州 350002)

摘要: 通过室内土柱试验, 模拟了镁肥及不同用量添加剂包括生物质炭、有机肥、石灰施用土壤后镁素的有效性及其迁移淋溶特征。结果表明: 施用添加剂后均不同程度提高施肥土层(0~15 cm)土壤 pH。施用镁肥、生物质炭、50% 需求量石灰与 3.3、6.6 g/kg 有机肥后, 施肥土层交换性镁含量显著增加, 而 10 g/kg 有机肥与 100%、200% 需求量石灰施用则降低施肥土层交换性镁含量; 各处理土壤表层交换性镁含量范围为 14.61~126.03 mg/kg。施用有机肥与石灰后, 镁的迁移能力增强, 未施用肥料添加剂土层(15~50 cm)土壤交换性镁含量占土柱总量的 64%~86%, 而对照处理仅为 62%。施入生物质炭后, 镁淋失量最高, 且与施用量呈正比; 施用石灰则降低土壤镁淋失, 与对照处理相比, 最高可降低 7.95%; 施用有机肥镁淋失率最高为 46.58%, 固定率最低为 49%; 施用生物质炭后镁释放量最高为 507.4 mg, 与添加量呈正比, 而石灰、有机肥处理镁释放量为 101~156 mg。综合分析, 施用生物质炭后, 镁释放量与土壤有效镁含量最高; 施用石灰后, 镁淋失量最少, 淋失率最低。

关键词: 镁肥; 土壤添加剂; 镁淋溶; 迁移与固持; 酸性土壤

中图分类号: S153; S145.4 **文献标志码:** A

Study on Migration and Leaching of Magnesium in Soil Treated by Magnesium Fertilizer and Additives

JIANG Yanan^{1,3}, ZHANG Yadong^{2,3}, YANG Wenhao^{2,3}, WU Liangquan^{2,3}, ZHANG Taoxiang^{1*}

(1 Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2 College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3 International Magnesium Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The availability and translocation leaching of Mg were studied in the lab by soil column simulating test treated with Mg fertilizer, different amounts of biochar, organic fertilizer and lime. The results showed that applying additives increased pH values of the fertilized soil layers (0–15 cm). Applying Mg fertilizer, biochar, 50% required lime, 3.3 g/kg and 6.6 g/kg organic fertilizer increased significantly exchangeable Mg content in the fertilized soil layer, while applying 10 g/kg organic fertilizer, 100% and 200% required lime decreased it, and exchangeable Mg content in the topsoil layer ranged from 14.61 to 126.03 mg/kg. Applying organic fertilizer and lime enhanced the migration ability of Mg. The content of exchangeable Mg in soil layer (15–50 cm) without fertilizer additive accounted for 64%–86% of the total soil column, while only 62% in the control treatment. Mg leaching with applying biochar was the highest, and it was proportional to the applied amount of biochar, while applying lime reduced Mg leaching, which was up to 7.95% lower than CK. Applying organic fertilizer obtained the highest leaching rate (46.58%) and the lowest fixed rate (49%) of Mg. Applying biochar got the maximum released amount of Mg (507.4 mg), which was proportional to the applied amount of biochar. The released amount of Mg with applying lime and organic fertilizer was 101–156 mg. In conclusion, the released amount of Mg and the available Mg content in soil were the highest with applying biochar while the leached amount and the leaching rate of Mg with applying lime were the lowest.

Key words: Magnesium fertilizer; Soil additives; Magnesium leaching; Migration and retention; Acidic soil

①基金项目: 国际镁营养研究所开放基金项目(IMI2018-10)资助。

* 通讯作者(xsnzheda2009@163.com)

作者简介: 姜亚男(1994—), 女, 山东海阳人, 硕士研究生, 主要从事镁肥在土壤中的淋洗及其有效性研究。E-mail: 1639558499@qq.com

镁是植物生长的必需营养元素之一。植物缺镁会导致光合作用减弱甚至中断,减少有机物的形成,从而引起作物产量和质量的下降^[1-2]。近几年,在农业生产上出现了很多作物缺镁现象^[3],镁素越来越引起人们的关注。

植物吸收的镁来源于土壤。白由路等^[4]对我国土壤有效镁含量的调查发现,我国 54% 的土壤因为有效镁含量低而需要不同程度补充镁肥,主要集中在我国南方酸性土壤地区。土壤中镁离子的外围包有很厚的水化层,负电荷对其吸引力较弱,因此镁在土壤中移动性很大,极易发生淋失^[5]。一般认为,在中性至酸性土壤中镁易于迁移。综合国内外镁素淋失的文献发现,板页岩红壤中的淋失量很大,为 127.7 mg/kg,淋失率为 79.9%,红色石灰土中的淋失量为 24.2 mg/kg,淋失率为 13.6%^[6]。降雨量大,镁的移动性大^[7]。过量施用氮肥,导致土壤酸化,土壤 pH 降低^[8],使土壤胶体所带负电荷减少,进而会减少土壤对镁的吸附^[7]。南方地区山地红壤由于湿热多雨以及不合理施用化肥导致土壤酸化,加剧了土壤中镁的淋失。

农业生产中通常通过施用改良剂改良土壤质地和酸碱度。添加剂不仅改良土壤,还提高了土壤养分含量。生物质炭具有较大的比表面积,且表面带有大量负电荷和较高的电荷密度,能够吸附土壤中的阳离子,减少土壤养分淋失,其独特的物理化学性质使其在土壤酸度改良方面具有巨大的潜力^[9-10]。有机肥作为农业生产中基本的、常用的肥料,富含矿质养分,施用有机肥可以培肥土壤,提高土壤微生物的活性,改善土壤性质和耕作性能,有利于土地资源的可持续

利用^[11]。施用石灰是改良酸性土壤的传统和有效的方法^[12]。施用石灰可以缓解土壤酸化,同时改善土壤结构,提高土壤的生物活性和养分循环能力,从而改善作物营养和生长状况,提高作物产量和品质^[13]。

目前国内外对于镁的研究主要集中在镁对植物的生理效应、镁肥效应等方面,但关于生物质炭、石灰等添加剂对于土壤镁迁移与淋失的影响,目前尚未见报道。南方地区土壤酸化、有效镁含量低且镁淋失现象严重,因此,探究不同添加剂对酸性土壤中镁含量及淋溶特征的影响对于提高农业生产中镁素的利用效率具有重要意义。本文通过室内土柱模拟试验,探究不同用量的生物质炭、有机肥、石灰施用对镁的淋溶及迁移特征的影响,并进一步确定不同添加剂的合理用量,以为南方酸性土壤地区改善土壤镁素供应提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自福建省平和县蜜柚园,为酸性低镁土壤。平和县位于福建省漳州市,气候湿热,降雨量充沛,土壤类型以山地红壤为主。土壤样品风干后,过 1 mm 筛备用。供试土壤的主要化学性质见表 1。本试验施用的生物质炭原料为秀珍菇废菌棒,采用密闭钢化炉 500℃ 厌氧烧制 2 h 制成。经测定,生物质炭 pH 为 9.47,养分含量:全氮 12.9 mg/g,全磷 40.0 mg/g,全钾 13.6 mg/g,全镁 17.4 mg/g,全钙 120.7 mg/g;商品有机肥养分含量:全磷 0.6 mg/g,全钾 4.9 mg/g,全镁 1.9 mg/g,全钙 97.4 mg/g。

表 1 供试土壤基本化学性质
Table 1 Basic chemical properties of the tested soil

土壤类型	pH	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	有效钾(mg/kg)	交换性镁(mg/kg)	交换性钙(mg/kg)	交换性铝(mg/kg)
红壤	4.51	18.41	107.92	7.47	115.75	31.87	177.84	227.08

1.2 试验设计

试验共设置 11 个处理:处理 1,不添加镁肥和添加剂(CK);处理 2,添加镁肥(CK+Mg),Mg 施用量为 150 kg/hm²,镁肥为七水硫酸镁;处理 3~5 分别在处理 2 的基础上添加质量分数为 2%(T1)、5%(T2)、8%(T3)的生物质炭;处理 6~8 分别在处理 2 的基础上添加 3.3 g/kg(Y1)、6.6 g/kg(Y2)、10 g/kg(Y3)商品有机肥;处理 9~11 分别在处理 2 的基础上添加 50%(S1)、100%(S2)和 150% 石灰需求量(S3)的石灰,100% 石灰需求量通过碳酸钙滴定法得到,为 1.76 g/kg,本试验总石灰需求量按照整个土层

进行计算,石灰以碳酸钙的形式施入。每个处理 3 次重复。试验前肥料、添加剂按施肥习惯仅施在 0~15 cm 土层。采用室内土柱模拟^[14]外源镁肥在土壤中的淋溶。土柱采用硬质聚氯乙烯管(PVC),内径 7.5 cm,高 55 cm。分次填装土样以保证土柱内土壤容重上下一致,土壤容重设置为 1.3 g/cm³。试验前,用去离子水将土柱水分调节至 65% 田间持水量,25℃ 预培养 5 d。试验采用间歇淋溶法,每次向土柱中加入 685 ml(以平和县年降雨量 1 782.5 mm 及土柱面积计算)去离子水,共淋溶 10 次,持续 60 d。淋洗液用大漏斗承接于 250 ml 三角瓶中。

试验期间,每 6 d 接收 1 次淋洗液,量取其体积后用作溶液 pH 与镁含量测定。试验结束后,按照 0~15、15~30、30~50 cm 土层采样,风干后测量土壤 pH 与交换性镁含量。

1.3 测定项目及方法

土壤及淋洗液 pH 用 pH 计测定(水土质量比为 2.5:1);土壤有机质采用重铬酸钾-浓硫酸外加加热法测定;土壤碱解氮采用氢氧化钠水解法测定;土壤有效磷采用氟化铵-盐酸浸提方法,ICP-OES 测定;土壤速效钾采用乙酸铵交换法,火焰光度计测定;土壤交换性钙、交换性镁含量采用乙酸铵交换法,ICP-OES 测定;土壤交换性铝采用氯化钾交换法,ICP-OES 测定;淋洗液镁浓度采用 ICP-OES 测定^[15]。生物质炭及有机肥全氮、全磷、全钾采用硫酸-过氧化氢消解,流动分析仪、ICP-OES、火焰光度计分别测定^[16];生物质炭、有机肥全镁及全钙采用硝酸-高氯酸消解,ICP-OES 测定^[17]。

1.4 数据处理与分析

镁淋失率(%)=(镁肥处理及添加剂处理镁淋失量-对照镁淋失量)/(镁肥投入量+添加剂镁投入量)×100;

镁固定率(%)=(镁肥及添加剂镁投入量-土壤交换性镁增量-镁淋失量)/镁肥及添加剂镁投入量×100;

镁释放量(总)=土壤剩余镁量+镁淋洗量。

采用 Excel 2016 软件对数据进行处理和绘图,采用 SPSS 21.0 软件对数据进行差异显著性检验(最小显著差异(LSD)法)。

2 结果与讨论

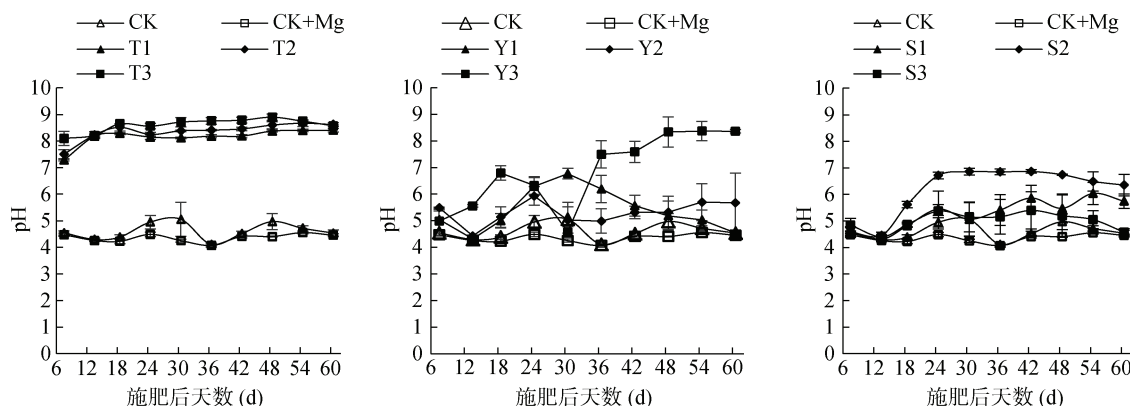
2.1 不同添加剂处理下淋洗液及土壤 pH 变化特征

相比 CK 处理,添加生物质炭、有机肥和石灰均显著提高淋洗液 pH, pH 变化趋势与添加剂的施入量有关(图 1)。试验期间 CK 处理淋洗液 pH 变化不大,添加镁肥后,淋洗液 pH 下降,但无显著差异。添加生物质炭后淋洗液 pH 从 5 提升到 8, T1 处理淋洗液 pH 的提升效果略低于 T3 处理。这是由于生物质炭呈碱性,其施用中和了土壤酸度,提高淋洗液 pH。

不同用量有机肥添加后,淋洗液 pH 的变化趋势不同, Y1 与 Y2 处理试验前期均存在 pH 下降的趋势,后期 Y2 处理缓慢上升, Y1 处理则快速上升后下降; Y3 处理 pH 变化趋势不同于 Y1、Y2 处理,变化趋势为略微上升后迅速下降,迅速上升后保持平稳不变,试验后期其 pH 达到最大值为 8.3。

添加石灰不同程度提高淋洗液 pH。第 3 次淋洗之前,添加石灰处理与 CK 处理差异不大,均呈下降趋势;第 3 次淋洗后,石灰处理淋洗液 pH 开始上升, S2、S3 处理在 24 d 时 pH 达到最大值,后呈缓慢下降趋势, S1 处理则呈波动上升趋势。3 个石灰处理中淋洗液 pH 表现为: S2>S1>S3。由试验结果可以看出,添加石灰改良土壤酸度需要一定的反应时间,且改良效果与添加量有关,本文中以 100% 石灰需求量处理(S2)效果最好。石灰调节了土壤酸碱度,提高淋洗液 pH^[18]。

根据图 1 中淋洗液 pH 变化趋势可知,添加生物质炭对土壤淋洗液 pH 提升效果最大,其次是有机肥、石灰,且 pH 上升程度与其添加量有关。



(CK, 不施肥; CK+Mg, 施用镁肥; T1~T3 为在 CK+Mg 基础上添加质量分数为 2%、5%、8% 生物质炭; Y1~Y3 为在 CK+Mg 基础上添加 3.3、6.6、10 g/kg 有机肥; S1~S3 为在 CK+Mg 基础上添加 50%、100%、150% 需求量石灰;下同)

图 1 不同处理土壤淋洗液 pH 曲线

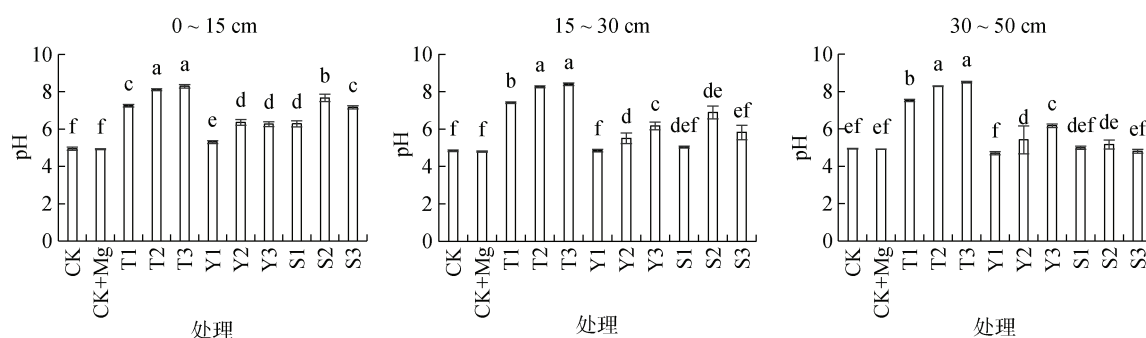
Fig. 1 pH curves of leachates from soil columns under different treatments

经过 60 d 的淋洗,不同处理不同土层的 pH 变化不同(图 2)。淋洗结束后,CK 与 CK+Mg 处理土壤

pH 由 4.5 上升至 4.9。有研究^[19]认为,淋洗后土壤 pH 上升与其盐分含量有关,即土壤 pH 随土壤全盐量的

降低而逐渐增加。试验中施用的添加剂均呈碱性,施用 3 种添加剂后均显著提高了表层 0~15 cm 及中层 15~30 cm 土壤的 pH,且生物质炭与有机肥对土壤酸度的改良作用可达 30~50 cm 的底层土壤。3 种添加剂中,以生物质炭对土壤酸度改良效果最好,添加生物质炭后,土壤 pH 最高可达 8.51,且 pH 的增加与生物质炭的添加量呈正相关关系。这一方面是由于生物质炭呈碱性,施入土壤后能够降低土壤交换性酸含量^[20];另一方面是由于生物质炭含有大量可溶态盐基阳离子,施入酸性土壤中会提高土壤的盐基饱和度,并提高土壤 pH^[19]。施用有机肥显著提高表层土壤 pH,Y2、Y3 处理会显著提高中、下层土壤 pH,有机肥具有调节土壤 pH 的功能,施入有机肥可以补

充伴随阴离子淋洗的土壤盐基离子,提高土壤的缓冲能力^[21];同时,有机肥含有大量有机质,能够吸附盐基离子,提高土壤 CEC,增加土壤酸缓冲容量^[22-23]。施入石灰后,表层与中层土壤 pH 显著提高(图 2),本试验中以 S2 处理即 100% 石灰需求量处理效果最好。另外,施用石灰后期不加以补充,土壤会出现复酸化现象。本试验中,施用石灰处理不同程度提高淋洗液 pH,但是在试验后期,S3 处理淋洗液 pH 降低至 CK 处理,由此说明过量施用石灰会增加土壤中 HCO_3^- 活度,加速有机质的分解和还原态氮、硫的释放^[9]。施用石灰,消耗了土壤中的 H^+ ,施用初期可显著提高土壤 pH,但随着土壤黏粒中潜性酸释放和土壤缓冲性能作用,其改良效果会随时间变化逐渐减弱^[24]。



(图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同)

图 2 不同处理对土壤不同土层 pH 的影响

Fig. 2 pH values of various soil layers under different treatments

2.2 不同添加剂处理下镁的淋洗特征

不同处理对淋洗液的体积影响不同,试验期间同一处理淋洗液体积随时间呈上升趋势,不同处理趋势相对一致,淋洗液体积均保持在 400~600 ml。与 CK 处理相比,添加生物质炭、有机肥、石灰均能不同程度减少淋洗液体积,其中以 T3 处理、Y3 处理效果最为明显。石灰梯度处理中以 S2 处理效果较明显。由此说明,不同添加剂对土壤持水能力影响不同。

图 3 为不同时期淋洗液 Mg^{2+} 浓度变化曲线。与

CK 处理相比,添加镁肥后,CK+Mg 处理淋洗液 Mg^{2+} 浓度略微升高,且两个处理均在 13 d 时 Mg^{2+} 浓度达到峰值。生物质炭的施用向土壤中补充了 Mg^{2+} ,因此添加生物质炭后,淋洗液 Mg^{2+} 浓度显著升高,且与生物质炭添加量呈正比。有机肥添加后,淋洗液 Mg^{2+} 浓度显著升高,且与其添加量呈正比。有机肥处理变化趋势与 CK 处理相似,13 d 时 Mg^{2+} 浓度达到峰值后逐渐下降。与 CK 处理相比,3 个石灰梯度下,S2、S3 处理在不同时间、不同程度上降低了淋洗液

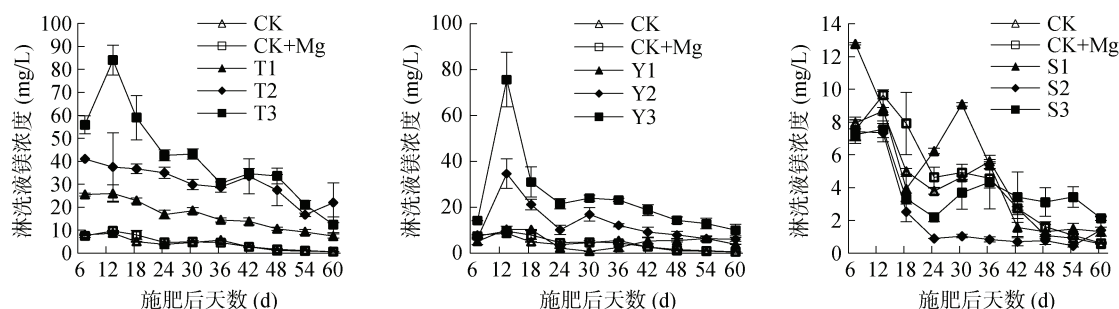


图 3 不同处理土壤淋洗液镁浓度曲线

Fig. 3 Mg^{2+} concentration curves of leachates from soil columns under different treatments

中的 Mg^{2+} 浓度。试验前 54 d, S2 处理 Mg^{2+} 浓度显著低于 CK 处理, 试验结束时, 淋洗液 Mg^{2+} 浓度则略高于 CK 处理; 前 36 d, S3 处理 Mg^{2+} 浓度低于 CK 处理, 并高于 S2 处理, 36 d 后, 淋洗液 Mg^{2+} 浓度显著高于 CK 处理。

随着试验的进行, 各处理镁的累积淋失量呈逐渐增加的趋势, 试验结束后不同处理镁淋失量不同(图 4)。CK 处理镁累积淋失量为 20.47 mg, 施入镁肥后, 淋失量为 22.64 mg, 镁肥的镁淋失率为 1.62%(表 2)。添加生物质炭后镁淋失量显著增加, 且与其添加量呈正比, 最高淋失量可达 193.66 mg, 但淋失率随生物质炭施加量的增加而降低, 最大淋失率为 7.46%, 最低则为 5.94%(表 2)。这是因为养分淋溶主要发生在溶液中, 生物质炭施入调节土壤中的水分, 减少淋洗液体积, 进而减少了土壤养分的淋溶损失; 同时, 生物质炭具有很高的阳离子交换量, 这表现在其具有高浓度的表面负电荷, 具有更强的养分持留能力, 抑制了养分的淋溶^[25]。生物质炭的添加量对土壤镁淋溶的影响不同, 随着施入量的增加, 镁的淋失率降低, 这一结果与前人^[26]氮淋洗研究类似。

随着有机肥施用量的增加, 镁的淋失量与淋失率增加, 最高淋失量可达 100.96 mg(图 4), 淋失率为 46.58%(表 2), 这可能是一方面由于大量有机肥添加后, 增加了土壤中水溶性镁的含量, 从而促进镁的淋

溶; 另一方面, 有机肥施入土壤后发生矿化作用, 且矿化过程中微生物活性增强, 促进了镁的释放, 增大了土壤镁淋失的可能性^[27]。因此, 在农业生产中要适当使用有机肥, 过量有机肥的投入会增加土壤养分淋失, 降低肥料利用效率。

一定量石灰添加后, 可降低镁淋失量与淋失率, 最低淋失量仅为 9.82 mg(图 4), 与 CK 处理相比可降低 7.95% 的镁淋失, 这一方面是由于酸性土壤中施用石灰会提高土壤 pH; 另一方面, 施用石灰引起镁与铝形成共沉淀, 降低水溶液中镁的活性^[23], 从而减少镁的淋失。

据研究^[28], 多雨和砂质土壤地区镁淋溶损失量最高可达 90 kg/hm^2 ; 李延等^[7]的研究结果显示, 在山地红壤龙眼园中, 不同施肥处理最高镁淋失量为 20 mg/kg , 最低为 8 mg/kg 。本试验 T2、T3 及 Y3 处理镁淋失量均高于最高镁淋溶量, 且最高淋失量可达 102 mg/kg ; 最低淋失量为 S2 处理, 仅为 6 mg/kg ; 其余处理淋失量则在 $10 \sim 40 \text{ mg/kg}$ 。综合镁淋失率与淋失量, 3 个不同用量中, S2 处理即 100% 石灰需求量对土壤镁淋溶调控效果最好; 生物质炭 T3 处理镁的淋失量高但整体淋失率最低为 5.94%, 提高了肥料利用效率; 有机肥 Y1 处理淋失量与只添加镁肥处理的淋失量相似, Y2、Y3 处理则加剧了镁的淋失。

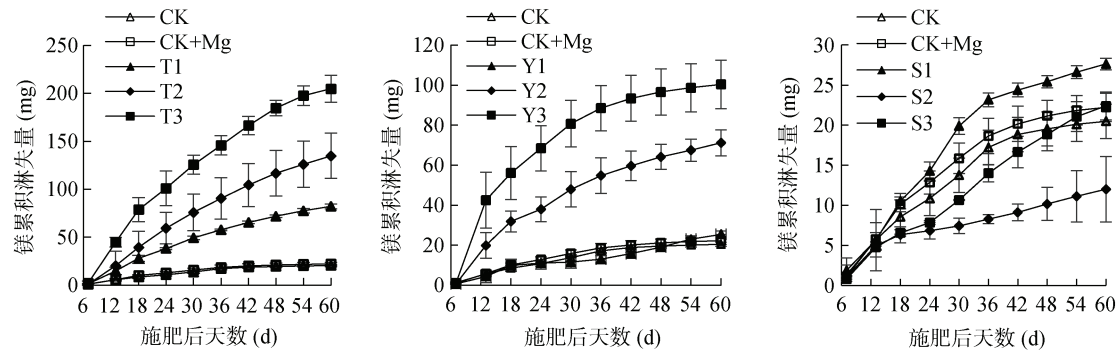


图 4 不同处理下镁累积淋失量
Fig. 4 Accumulated leaching amounts of magnesium from soil columns under different treatments

表 2 不同处理镁淋失率(%)
Table 2 Leaching rates of magnesium of soil columns under different treatments

处理	CK+Mg	T1	T2	T3	Y1	Y2	Y3	S1	S2	S3
淋失率	1.62	7.46	7.20	5.94	4.16	32.19	46.58	3.75	-7.95	-0.42

注: 负号表示镁肥与添加剂施用后与 CK 相比减少了镁的淋失。

试验结束后, 测定生物质炭、有机肥与石灰施用处理中镁的固定率, 发现处理间无显著差异, 固定率均大于其投入量的 90%(图 5)。随着有机肥用量的增加, 镁的固定率显著下降至 49%, 由此

说明, 试验期间, 有机肥中大部分镁被淋失。将土壤剩余交换性镁含量与淋失量之和定义为镁的释放量, 各处理的释放量减去 CK 处理的释放量为镁肥与添加剂处理的释放量。如图 5 所示, 各

添加剂处理的镁释放量均高于 CK 处理, 添加生物物质炭后镁的释放量显著高于有机肥、石灰处理, 且释放量与其生物物质炭添加量呈正比, T3 处理镁

释放量最高。有机肥 Y2、Y3 处理镁释放量显著高于石灰 S2、S3 处理; 但 Y1 处理则与使用石灰处理镁释放量无显著差异。

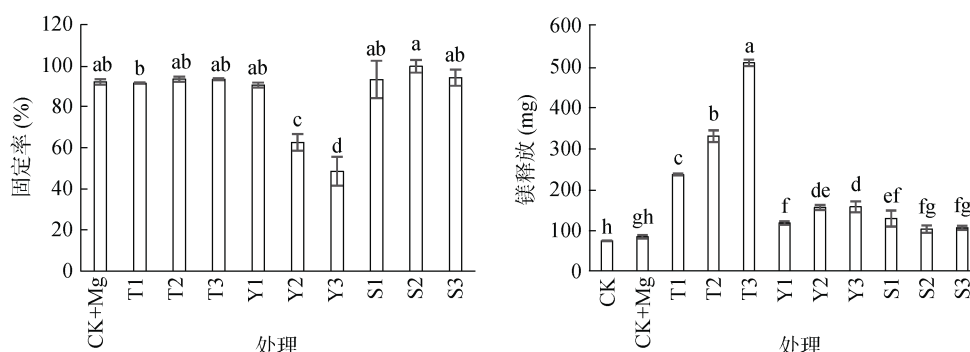


图 5 不同处理下镁的固定与释放

Fig. 5 Fixation and release of magnesium of soil columns under different treatments

2.3 不同添加剂处理下土壤镁的含量与迁移

淋洗结束后, 不同添加剂处理下土壤交换性镁的含量不同(图 6)。不施肥 CK 处理不同土层交换性镁含量差异较小, 均保持在 25 ~ 27 mg/kg; 添加镁肥后, 提高表层土壤交换性镁含量, Mg^{2+} 随着淋洗向下迁移, 增加中层(15 ~ 30 cm)土壤镁含量, 随着土壤深度增加, 交换性镁含量降低。

添加生物物质炭后土壤交换性镁含量显著提高, 且与生物物质炭的添加量呈正比。T1 处理随土层的加深, 土壤镁含量逐渐降低, 不同土层交换性镁所占整层土壤镁含量的比例分别为 38%、35%、27%; T2、T3 处理则随着土层的加深镁含量逐渐升高, 底层土壤交换性镁含量最高可占总量的 40%。生物物质炭添加后释放大镁(图 6), 显著提高土壤中交换性镁的含量, 且与其添加量呈正比。T1 处理不同土壤层交换性镁含量为: 上层>中层>下层; T2、T3 处理含量为: 下层>中层>上层。这可能是少量生物物质炭的添加吸附能力较强, 大部分水溶性镁仅迁移到中层土壤, 而大量生物物质炭添加后, 增加了土壤中水溶性镁的含量, 生物物质炭的吸附能力达到饱和, 上层 Mg^{2+} 随着溶液迁移到中、下层土壤中。试验结束后, 有机肥处理土壤残留交换性镁含量降低(图 6), 并与有机肥施用量呈反比, Y3 处理土壤交换性镁总含量低于 CK 处理。有机肥添加后不同土层土壤剩余交换性镁含量为: 下层>上层>中层, 下层土壤镁含量最高, 可占总含量的 53%, 中层含量最低仅为 9%, 说明土壤中的 Mg^{2+} 迁移能力较强, 淋失加剧。

众所周知, 有机肥中含有大量养分, 施入土壤后向土壤带入大量镁, 且增加了土壤中微生物的活性。

肖辉等^[29]的研究发现, 有机肥施用后, 土壤矿化过程中微生物活性增强, 提高土壤 Olsen-P 的含量, 会促进土壤中 Olsen-P 的向下迁移, 增加其淋失, 这与本文中的结果相似。

施用石灰增加了土壤中交换性镁的含量, 不同添加量, 镁的迁移特征不同。本试验结果得出, 在淋洗过程中 S2 处理 Mg^{2+} 迁移速度较快, 上层土壤剩余镁含量仅占总量的 14%, 下层土壤则为 47%。添加石灰后, 土壤中有效镁的含量增加, 这是由于施用石灰改善了土壤中微生物的活动条件, 促进有机质的分解, 释放出养分, 增加了土壤中镁的含量^[30]; 另外, 土壤中大多数养分在土壤 pH 为 6.5 ~ 7.0 时有效性最高^[31], 试验中 S1、S2、S3 处理分别将上层土壤 pH 调节为 6.28、7.67、7.17, 活化了土壤中的有效镁, 表层交换性镁含量表现为 S1>S3>S2。少量石灰的施用不仅调节了土壤的酸度, 还增加了有效镁的含量, 这与前人^[32]研究结果相似。试验结束后, 有机肥、石灰处理均表现出下层土壤交换性镁含量明显高于上层与中层, 说明土壤中镁的迁移性强, 这可能是由于有机肥中含有大量的 K^+ 、 Ca^{2+} 以及石灰中的 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 置换, 减少了土壤对镁的吸附, 从而加剧了镁的迁移^[30]。

3 结论

添加生物物质炭、有机肥、石灰均能够改良土壤酸度, 提高土壤 pH。适量生物物质炭与石灰的添加不仅提高土壤中有效镁含量, 还能够减少镁的淋失并降低镁的淋失率; 少量有机肥也能补充土壤镁, 但是过量投入, 会产生镁淋溶损失, 降低土壤中交换性镁含量。

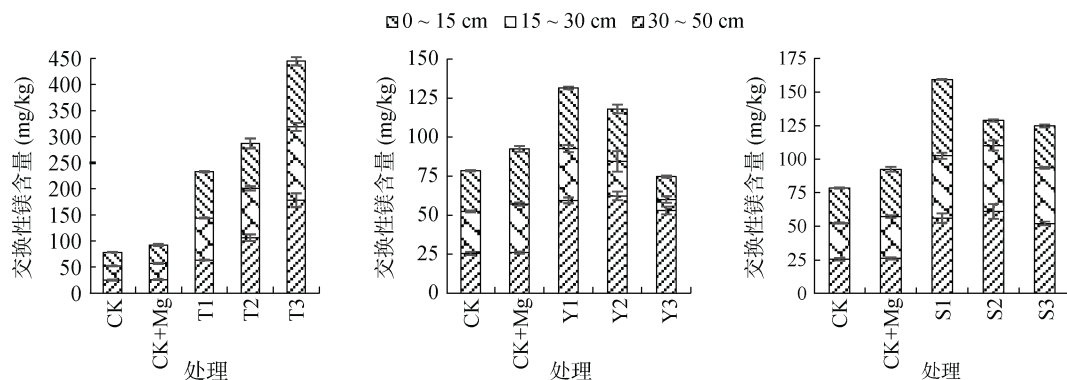


图 6 不同处理对土壤不同土层交换性镁含量的影响

Fig. 6 Exchangeable magnesium contents in various soil layers under different treatments

综合分析,生物质炭添加能够显著提高土壤中交换性镁含量,但在减少镁淋溶方面,100% 需求量石灰的添加效果最好。本文结论基于室内土柱模拟试验,未来需进一步通过盆栽和大田试验验证其生物有效性才能进一步推广至农业生产中。

参考文献:

- [1] Li C P, Qi Y P, Zhang J, et al. Magnesium-deficiency-induced alterations of gas exchange, major metabolites and key enzymes differ among roots, and lower and upper leaves of *Citrus sinensis* seedlings[J]. *Tree Physiology*, 2017, 37(11): 1564–1581.
- [2] 薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 等. 植物-土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展[J]. *土壤*, 2019, 51(1): 1–10.
- [3] Taiz L, Zeiger E. *Plant physiology*[M]. Sunderland: Sinauer Associates, 2010.
- [4] 白由路, 金继运, 杨俐苹. 我国土壤有效镁含量及分布状况与含镁肥料的应用前景研究[J]. *土壤肥料*, 2004(2): 3–5.
- [5] 金昆. 土壤对镁的吸附解吸特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- [6] 王伯仁, 游有文, 高菊生, 等. 湘南几种土壤钾、镁形态淋失及施用效果研究[J]. *广西农业科学*, 1999, 30(2): 3–5.
- [7] 李延, 刘星辉, 庄卫民. 山地龙眼园土壤镁素淋失特点模拟[J]. *山地学报*, 2000, 18(3): 248–252.
- [8] 曾慕梵. 长期施肥导致农田土壤酸化的机制及缓解策略[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [9] 王湛, 李银坤, 徐志刚, 等. 生物质炭对土壤理化性状及氮素转化影响的研究进展[J]. *土壤*, 2019, 51(5): 835–842.
- [10] Yuan J H, Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(1): 110–115.
- [11] 孙莹, 侯玮, 迟美静, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤腐殖质组分的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4): 940–952.
- [12] 程琳. 石灰施用对雷竹林土壤氮磷转化及流失的影响研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- [13] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(9): 206–213.
- [14] 李丹萍, 刘敦一, 张白鸽, 等. 不同镁肥在中国南方三种缺镁土壤中的迁移和淋洗特征[J]. *土壤学报*, 2018, 55(6): 1513–1524.
- [15] 鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 任嫦天, 王晓云, 王伟玲, 等. 微波、电热板和石墨消解-ICP-AES 在有机肥检测中的应用[J]. *技术与市场*, 2015, 22(1): 45, 47.
- [17] 谢涛, 龙智翔, 周琳, 等. ICP-AES 法测定微量元素叶面肥料中的金属元素[J]. *广西科学院学报*, 2010, 26(3): 298–299, 302.
- [18] 严锦申. 生石灰施用量对酸性土壤改良效果及对烤烟产质量的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [19] 王丽娜, 张玉龙, 范庆锋, 等. 淋洗状态下保护地土壤 pH 与盐分含量及其组成关系的研究[J]. *节水灌溉*, 2009(6): 8–11, 15.
- [20] 李贞霞, 任秀娟, 祁雪娇, 等. 辣椒秸秆生物炭对酸化土壤交换性能及酶活性的影响[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(1): 117–124.
- [21] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1109–1116.
- [22] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2): 260–270.
- [23] Curtin D, Fraser P M, Beare M H. Loss of soil organic matter following cultivation of long-term pasture: effects on major exchangeable cations and cation exchange capacity[J]. *Soil Research*, 2015, 53(4): 377–385.
- [24] 张瑶, 邓小华, 杨丽丽, 等. 不同改良剂对酸性土壤的修复效应[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 330–334.
- [25] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719–1730.

- [26] 刘玮晶, 刘烨, 高晓荔, 等. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 962–968.
- [27] 白加林, 张映杰, 张荣辉, 等. 促生菌剂与不同有机肥复配对植烟土壤交换性钙镁的影响[J]. 农学学报, 2019, 9(2): 38–42.
- [28] 谢建昌, 杜承林, 李伏生. 中国南方地区土壤镁素状况与需镁前景[C]//胡思农. 硫、镁和微量元素在作物营养平衡中的作用国际学术讨论会论文集. 成都: 成都科技大学出版社, 1993: 126–134.
- [29] 肖辉, 潘洁, 程文娟, 等. 不同有机肥对设施土壤有效磷累积与淋溶的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1195–1200.
- [30] 肖文芳. 施用石灰和磷矿粉对桃园土壤养分和树体营养的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [31] 敖俊华, 黄振瑞, 江永, 等. 石灰施用对酸性土壤养分状况和甘蔗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 266–269.
- [32] Farhat N, Elkhouni A, Zorrig W, et al. Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(6): 145.